

Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Modelamento de Turbulência por Formulações Médias
Bolsista: Renan Santos
Orientador(a): João Luiz Filgueiras de Azevedo
Período a que se refere o relatório: Novembro de 2015 a Julho de 2016

Resumo

O presente trabalho se insere em uma linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida no Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE/ALA) há algum tempo e que tem por objetivo criar a capacidade de simular escoamentos turbulentos de interesse aeroespacial utilizando uma formulação baseada nas equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS). O uso de uma formulação RANS é o padrão da indústria aeroespacial mundial para o tratamento de escoamentos sobre configurações realistas. Tal formulação, entretanto, requer que os efeitos de turbulência sejam modelados por uma técnica de fechamento adequada, de forma a representar os efeitos físicos dos escoamentos turbulentos de interesse, mas a um custo computacional aceitável quando se trata de configurações complexas. O trabalho envolve a validação de alguns modelos de turbulência já disponíveis na versão atual do código BRU3D, que é a ferramenta desenvolvida no IAE/ALA para implementar tais formulações. Em princípio, foram abordados modelos lineares de viscosidade de vórtice (EVM), versões não lineares de tais modelos e modelos de tensão de Reynolds sobre um perfil extrudado do aerofólio supercrítico OAT15A. Resultados obtidos para o campo de número de Mach para o escoamento sobre o aerofólio OAT15A, com condições de escoamento não perturbado com $M_\infty = 0.722$ e $AoA = 1.15^\circ$, demonstram a validação dos modelos implementados. Estes cálculos foram realizados por três métodos diferentes de modelagem de turbulência, obtendo satisfatoriamente o mesmo resultado, exceto pela presença de discrepâncias na esteira o que gerou interesse em avaliar o campo de viscosidade turbulenta.

1. Introdução

Turbulência é caracterizada por um movimento do fluido aparentemente randômico, tridimensional e caótico, que pode afetar significativamente quaisquer outros fenômenos no



escoamento aumentando o arrasto, a dissipação de energia, a difusão e a transferência de calor [1]. A maior necessidade em se estudar turbulência é o fato de este fenômeno ser encontrado na grande maioria dos escoamentos na natureza e em diversas aplicações em engenharia. Cotidianamente, ao se derramar leite sobre uma xícara de café, ao se observar vórtices do ar que sopram folhas caídas e até mesmo ao se abrir demais uma torneira, vive-se exemplos de turbulência. Não obstante, o comportamento caótico e complexo da turbulência é visto de forma relevante em diversos assuntos de interesse da comunidade científica e da indústria. Em particular, para aplicações que envolvem escoamentos com números de Reynolds altos, observa-se que flutuações estatísticas e desordenadas surgem sobre as propriedades do fluido intensificando abruptamente a troca de calor, a espessura da camada limite, o arrasto, entre outros diversos efeitos de interesse na mecânica de fluidos [2].

Toda a física do movimento e da termodinâmica de um fluido contínuo pode ser representada por três leis constitutivas: lei da conservação da massa, lei da conservação da quantidade de movimento e lei da conservação de energia. Pela complexidade e grande particularidade nas soluções analíticas até então demonstradas dessas equações é necessário o apoio do que se vem desenvolvendo na Dinâmica de Fluido Computacional, CFD na sigla em inglês, a qual torna possível de se computar toda a fenomenologia de um escoamento. Em particular, existem diversos cientistas e engenheiros que contribuíram com formulações numéricas em CFD diretas conhecidas como DNS, do inglês *Direct Numerical Simulation*, que objetivam simular a faixa completa das escalas físicas que contém informações sobre o fluido. Contudo, pode ser impraticável para a grande maioria dos problemas de interesse da indústria e da comunidade científica uma vez que os efeitos de turbulência são próprios de escalas físicas tanto grandes quanto muito pequenas.

O maior problema com relação às escalas é devido ao tamanho do menor vórtice ser inversamente proporcional a $Re^{\frac{3}{4}}$, onde Re é o número de Reynolds. Essa relação é chamada de escala de Kolmogorov a qual define a menor escala que captura a dissipação turbulenta causada por esses vórtices, também chamados de *eddies*. Em um problema real da indústria aeroespacial, por exemplo o escoamento sobre um avião, o número de Reynolds está por volta de 10^8 . Pelo próprio tamanho do avião, é necessário simular escalas grandes da ordem de comprimentos do mesmo, que está entre 10 e 10^2 metros. Além disso, na simulação é

comum que o domínio seja da ordem de 10 a 100 cordas do objeto estudado. Já como a menor escala a ser simulada é a escala de Kolmogorov, nesse exemplo, seria necessário que a escala fosse de ordem de 10^{-6} metros. Ao se gerar uma malha computacional para a discretização desse problema, o número de pontos necessários seria extremamente alto e assim o custo computacional, que em termos de número de operações é proporcional a $Re^{\frac{9}{4}}$, resultaria em aproximadamente uma ordem de 10^{18} operações. Isto é, portanto, impraticável visto o dinamismo da indústria e a limitação de processamento da tecnologia atual [3].

Dado que simulações diretas se tornam inviáveis no cotidiano da indústria e da comunidade científica, metodologias de modelagem de turbulência foram desenvolvidas como base auxiliadora a fim de sofisticar as simulações. A ideia é que, ao invés de se resolver as equações completas acopladas para todas as escalas, seja resolvida apenas uma faixa menor, porém computando os efeitos de turbulência desses comprimentos desprezados via um modelo representativo. Como dito anteriormente, os escoamentos turbulentos são caóticos, sendo assim, é necessário buscar uma forma para tratar de maneira estatística os efeitos que fazem com que as propriedades do fluido oscilem. O que é feito comumente é aplicar filtros temporais sobre as equações de governo e, como os termos convectivos são, por natureza, não lineares, alguns termos novos surgem aumentando mais ainda o número de variáveis e se tornando assim um sistema indeterminado dado o desbalanceamento entre o número de equações e variáveis. Os modelos de turbulência servem justamente para determinar esses novos termos a fim de resolver o problema de fechamento das equações de governo após implementação da formulação de médias de Reynolds ou *Reynolds-averaged Navier Stokes equations*, RANS na sigla em inglês. Na literatura existe uma grande quantidade de modelos de turbulência, porém por definição de escopo inicial deste trabalho, restringe-se apenas a modelos que estão implementados no BRU3D, código desenvolvido no Instituto de Aeronáutica e Espaço, IAE. Dentre esses, será objetivo desse trabalho desenvolver um mínimo de aptidão com alguns modelos pertencentes a três grupos: modelos lineares de viscosidade turbulenta (LEVM, na sigla em inglês), modelos não lineares da viscosidade turbulenta (NLEVM na sigla em inglês) e modelos de tensão de Reynolds (RSM na sigla em inglês) [4].

2. Materiais e Métodos

A turbulência é um fenômeno essencialmente tridimensional e viscoso o que traz o conjunto completo de equações com cinco variáveis a serem determinadas na solução, como discutido anteriormente. A partir de um determinado valor crítico para o número de Reynolds, o escoamento começa a ter mudanças significativas na direção das linhas de correntes fazendo com que essas representem um movimento totalmente caótico do fluido devido às flutuações em suas propriedades. O passo inicial para que esse fenômeno seja considerado nos modelos de turbulência de forma prática é assumir que seja analisado um histórico das propriedades num determinado intervalo de tempo grande o suficiente para capturar o comportamento físico esperado em um regime não turbulento, ou laminar, porém pequeno o suficiente para que a média das flutuações seja nula. Portanto, é possível representar as propriedades do fluido como sendo a propriedade média mais as flutuações devido à natureza caótica da turbulência.

Contudo, como algumas propriedades, como velocidade e energia interna, para escoamentos compressíveis estão acompanhadas de um produto com a densidade do fluido é necessário uma média ponderada pela densidade chamada filtro de Favre. Abaixo estão definidos o filtro de Reynolds e o de Favre, seguidos de algumas propriedades dos mesmos.

Média de Reynolds

$$\overline{A(\mathbf{x}, t)} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} A(\mathbf{x}, t + \tau) d\tau \quad (2.1)$$

onde

$$A = \overline{A} + A'$$

representando uma propriedade qualquer A como sendo a propriedade média (\overline{A}) mais as flutuações (A') e T é o intervalo temporal discutido.

Filtro de Favre

$$\tilde{A} = \frac{\overline{\rho A}}{\overline{\rho}} \quad (2.2)$$

onde

$$A = \tilde{A} + A''$$

Algumas propriedades importantes desses filtros que vêm por definição do filtro.

- As médias de Reynolds das flutuações no período T é nula.

$$\overline{A'} = 0 \quad (2.3)$$

- As médias de Reynolds das flutuações ponderadas pela densidade é nula.

$$\overline{\rho A''} = 0 \quad (2.4)$$

As variáveis do escoamento podem ser escritas, portanto, da seguinte forma.

$$\begin{aligned} \rho &= \bar{\rho} + \rho' \\ \rho u_i &= \overline{\rho u_i} + (\rho u'_i) \\ e &= \bar{e} + e' \\ p &= \bar{p} + p' \\ \tau_{ij} &= \overline{\tau_{ij}} + \tau'_{ij} \\ q_j &= \bar{q}_j + q'_j \\ \rho h &= \overline{\rho h} + (\rho h') \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde h é a entalpia específica sendo definida como

$$h = e_{int} + \frac{p}{\rho}$$

Para os casos compressíveis, algumas variáveis devem ser filtradas ponderando com a densidade e assim são definidas como abaixo.

$$\begin{aligned} \tilde{u}_i &= \frac{\overline{\rho u_i}}{\bar{\rho}} \\ \tilde{h} &= \frac{\overline{\rho h}}{\bar{\rho}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

e

$$\begin{aligned} u_i &= \tilde{u}_i + u''_i \\ h &= \tilde{h} + h'' \end{aligned} \quad (2.7)$$

A partir dessas definições é possível demonstrar as formulações médias de Reynolds não estacionárias, URANS do inglês *Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes*.

Eq. da Continuidade:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.8)$$

Eqs. de Quantidade de Movimento:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\tau_{ij}} - \overline{\rho u_i'' u_j''}) = 0 \quad (2.9)$$

Eq. da Energia:

$$\frac{\partial \bar{\rho} e_0}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\bar{\rho} e_0 + \bar{p}) \tilde{u}_j] + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{\rho u_j'' h}) - \frac{\partial}{\partial x_j} [\tilde{u}_i (\overline{\tau_{ij}} - \overline{\rho u_i'' u_j''}) + \overline{u_i'' (\tau_{ij} - \frac{\rho u_i'' u_j''}{2})}] + \frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (2.10)$$

Comparando essas novas equações com as equações de governo, nota-se que alguns termos novos surgem os quais podem ser denominados, com relação aos fenômenos que representam, como descrito a seguir.

- Tensões de Reynolds -> $\overline{\rho u_i'' u_j''}$
- Termos de fluxo de calor de Reynolds -> $\overline{\rho u_j'' h}$
- Termos de dissipação de Reynolds -> $\overline{u_i'' (\tau_{ij} - \frac{\rho u_i'' u_j''}{2})}$

Esses termos contém o efeito da turbulência sobre as equações de governo trazendo também o não fechamento das mesmas. Assim é necessário derivar novas equações ou apresentar modelos representativos.

Entre diversas propostas de modelamento de turbulência estão os modelos lineares de viscosidade turbulenta (EVM) que se baseiam na hipótese de Boussinesq de que os novos termos nas equações de quantidade de movimento, devidos às flutuações, agem como uma viscosidade turbulenta. Assim, as taxas de cisalhamento turbulentas podem ser aproximadas por uma relação linear com as taxas de deformação do fluido de forma análoga à viscosidade newtoniana, porém considerando um coeficiente de viscosidade turbulenta. O coeficiente de viscosidade turbulenta é proporcional à escala das flutuações de velocidade e a um comprimento característico definido como a distância viajada por uma partícula de fluido até que essa perca sua quantidade de movimento de identidade e comece a caminhar de forma randômica [5].

3. Resultados

O objeto de estudo para as execuções do BRU3D neste trabalho foi o aerofólio OAT15A a partir de uma malha de 255 x 64 elementos. Tal malha foi gerada desenhando o perfil do aerofólio e extrudando perpendicularmente ao plano X-Y como pode ser visto na Figura 1.

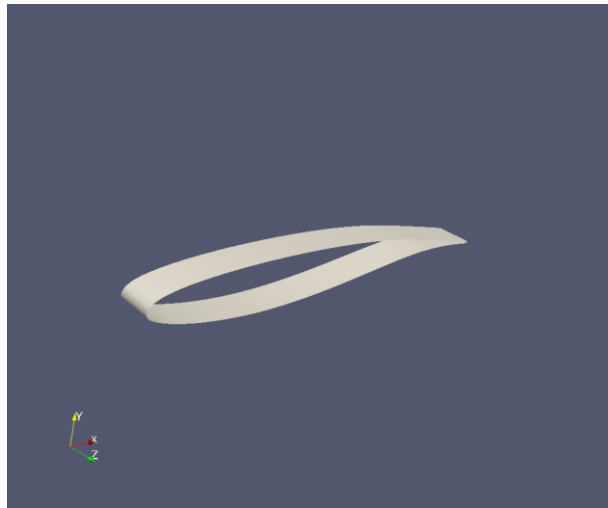


Figura 1 - Configuração do volume extrudado do aerofólio.

A Figura 2 ilustra um corte da malha no plano X-Y contendo uma visão próxima e outra distante do perfil.

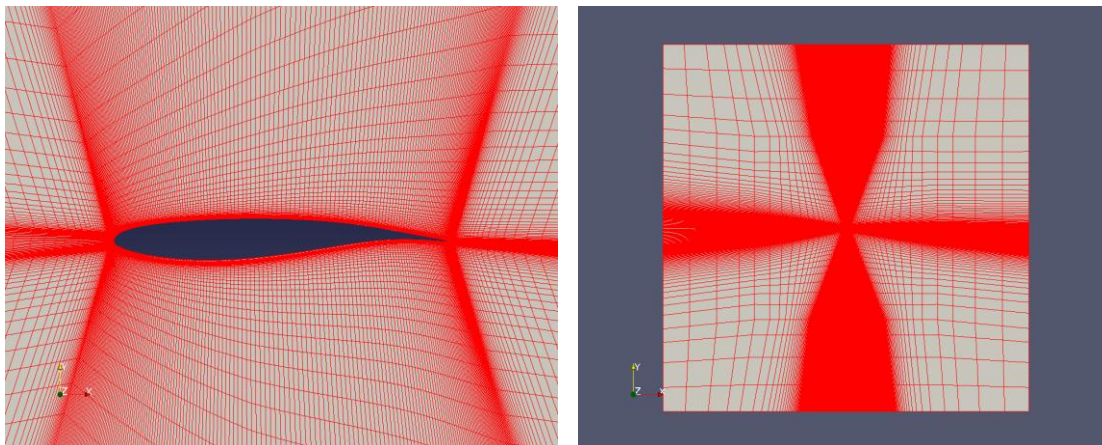


Figura 2 - Malha gerada sobre o aerofólio OAT15A com uma posição da fronteira distante de 200 cordas.

A Tabela 1 e 2 mostram as principais especificações e parâmetros para a realização das simulações, em que os três métodos de fechamento de turbulência - Spalart-Allmaras, NBSL e SST – foram configurados e rodados.

Tabela 1 - Parâmetros de input nos modelos de turbulência e condições de contorno.

Modelos	Parâmetros dos modelos de turbulência			Condições de Contorno no <i>Farfield</i> (SI)						
	μ	ρ_k	ρ_ω	u	v	w	P	T	tur	
S.A.	1.00E-07	-	-	212.982	4.2754	0	12788.278	216.66	0.0007	63.0
NBSL	-	0.14	130	212.982	4.2754	0	12788.278	216.66	0.7	63.0
SST	-	0.14	130	212.982	4.2754	0	12788.278	216.66	0.7	63.0

Tabela 2 - Considerações iniciais do problema e do escoamento não perturbado.

Parâmetros de entrada					
AoA (°)	ρ_∞ (kg/m ³)	U_∞ (m/s)	P_∞ (N/m ²)	Corda(m)	M_∞
1.15	0.20566	213.025	12788.278	0.1	0.722

Os resultados a seguir são as validações do código com resíduo convergido de 10^{-7} e comparações de resultados entre diferentes modelos de turbulência. Nota-se que os contornos de número de Mach são muito próximos, havendo pequenas diferenças nas esteiras.

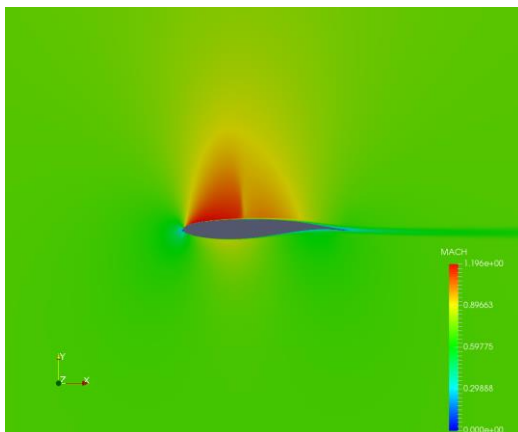


Figura 3.a - Campo de número de Mach usando SA.

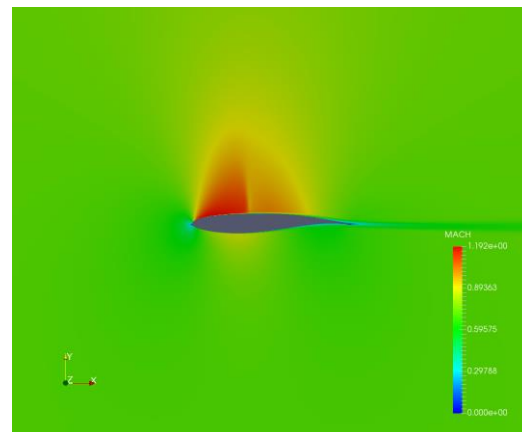


Figura 3.b - Campo de número de Mach usando NBSL.

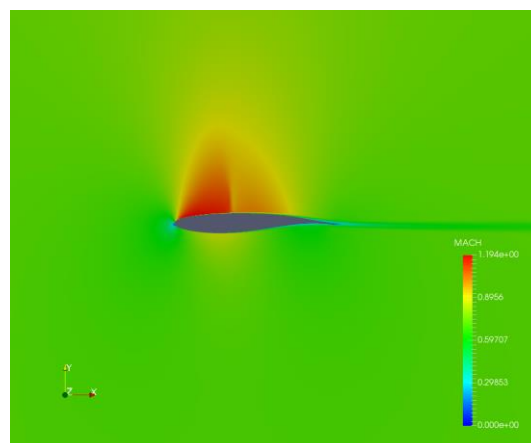


Figura 3.c - Campo de número de Mach usando SST.

Para verificação dessas variações da espessura da esteira, observou-se o campo de viscosidade turbulenta (μ_t) o que apresentou diferenças de até uma ordem de grandeza, como pode ser observado na Figura 4.

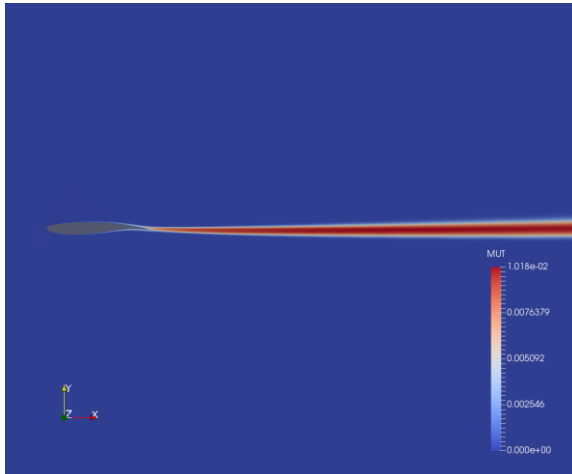


Figura 4.a - Campo da viscosidade turbulenta usando SA.

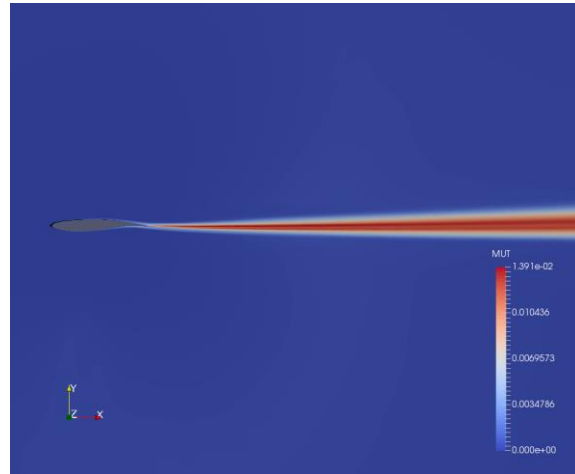


Figura 4.b - Campo da viscosidade turbulenta usando NBSL.

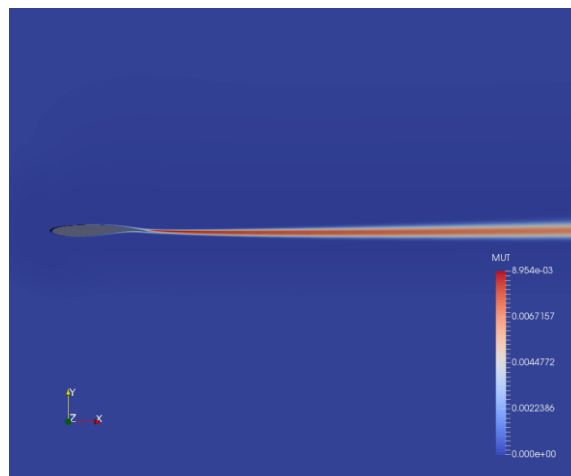


Figura 5.c - Campo da viscosidade turbulenta usando SST.

Para futuros trabalhos:

- Validação de gráficos CL/CD com comparações empíricas realizadas em túnel de vento disponíveis na literatura.
- Validações sobre geometrias mais complexas.
- Comparações com versões 2-D do BRU3D (BRU2D).
- Validações de modelo de turbulência de tensão de Reynolds já implementado no BRU3D (CLRSM).



4. Conclusões

Os resultados obtidos neste trabalho utilizando a malha sobre o OAT15A validam a atual versão do BRU3D para os três modelos de turbulência Spallart-Allmaras, NBSL e SST em comparação aos resultados obtidos nas primeiras versões, na Ref. [4]. No entanto, é possível buscar maior efetividade com implementações em configurações com maior ângulo de ataque validando perfis de CL/CD e assim como aplicações sobre geometrias mais complexas. Isto possibilita a continuidade do presente trabalho juntamente com a proposta de se comparar resultados do BRU3D com versões 2-D axissimétricas. O presente trabalho de iniciação científica será concluído uma vez que a bolsa será encerrada no final de julho de 2016, já que o bolsista iniciará um programa de mestrado no ITA em agosto de 2016. No entanto, o trabalho científico será continuado visto que o bolsista pretende estender a pesquisa aqui iniciada como seu trabalho de mestrado.

Referências

- [1] Geroge, W. K. Lectures in Turbulence for the 21st Century. 2013. University Lecture. Citado na página 15.
- [2] Compass Ingenieria y Sistemas. Turbulence Handbook. Barcelona, Spain: [s.n.], 2015. Citado na página 15.
- [3] Hirsch, C. Numerical Computation of Internal and External Flows. Second edition. Burlington, MA, USA: ELSEVIER, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 21.
- [4] Bigarella, E. D. V. Advanced Turbulence Modelling for Complex Aerospace Applications. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, São José dos Campos, SP, Brasil, 2007. Acesso em: 20 apr. 2016. Citado na página 17.
- [5] Kundu, P. K. Fluid Mechanics. Second edition. Dania, FL, USA: Academic Press, 2002. Citado na página 27.